干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近59 a锡林河流域潜在蒸散发及地表干湿状况变化趋势分析

张 璐[1]， 朱仲元[1]， 张圣微[1]， 王慧敏[1]， 王 飞[1]， 席小康[2]

（1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2 陕西省水文水资源勘测局，陕西 西安 710068）

摘 要： 利用1960—2018年锡林河流域周边13个气象站的逐日气象资料，采用世界粮农组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations，FAO）推荐的Penman-Monteith公式计算各气象站多年潜在蒸散发量及相对湿润度指数。通过利用主成分分析、相关分析和偏相关分析，探讨了锡林河流域潜在蒸散发、地表干湿状况多年变化规律；分析了影响潜在蒸散发的主要气象因子及各气象要素间的相互作用；着重讨论了锡林河流域潜在蒸散发的周期变化及其与相对湿润度指数、各气象要素的相互作用。结果表明：流域近59 a潜在蒸散发整体呈现增长趋势，且上升趋势显著，存在显著增加—减小交替的多尺度时频变化特征和多主周期变化规律；各气象要素中潜在蒸散发对温度的响应较大，平均风速次之；平均相对湿度受到潜在蒸散发的影响较大，降水次之。整个流域环境有不显著的变湿润趋势。

关 键 词： 锡林河流域；潜在蒸散发；地表干湿状况

文章编号： 1000－6060(2020)04－0997－07(0997～1003)

中国北方干旱半干旱地区是打造祖国亮丽北疆风景线的首要任务区，属生态脆弱区。在全球暖干化的背景下，加强区域气候要素变化规律和分布特征的研究势在必行。一般认为，气温升高会促使水体和地表蒸发增加[1]，而蒸发在水文循环中占据极其重要的地位，与地表水量、能量平衡密切相关[2]。自然界中蒸发现象颇为复杂，缺乏实测蒸发资料，导致区域潜在蒸散发量估算一直是水文气象研究的重点之一，通常利用潜在蒸散发（又称可能蒸发量）估算蒸发量。对于引起蒸发量变化的原因，在不同地区存在不同的影响因子，普遍认为干旱与半干旱地区蒸发量的变化与日照时数和水分状态有关[3]。

在估算潜在蒸散发的方法中，本文选用1998年修正的Penman-Monteith[4]公式，原因在于该公式可以全面反映气象要素的影响，是适用性较强的一种方法[5-6]。收集并整理1960—2018年锡林河流域13个气象站的日观测数据，分析在气候变化环境下流域潜在蒸散发量的变化趋势以及对气象因子的响应情况，进一步探讨流域近59 a来的地表干湿状况的趋势变化，旨在为半干旱草原型流域生态干旱研究提供参考和借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

锡林河发源于赤峰市克什克腾旗境内，属内陆河，全长198 km，流域面积6 263 km^2（图1）。锡林河以库尼苏曼为分界，库尼苏曼以上为上游，流经丘陵地带，河道异常弯曲，间或有沼泽地。库尼苏曼以下为中下游，河水折向北流，形成河涧盆地，最后注于白音淖尔湖[7-9]。该地区是典型的温带干旱

收稿日期： 2019－06－18； **修订日期：** 2019－11－04
基金项目： 国家自然科学基金项目（51779116）；地区科学基金项目（51669018，51869015）资助
作者简介： 张璐（1995－），女，硕士研究生，主要从事干旱半干旱区生态水文研究. E-mail：971568173@qq.com
通讯作者： 朱仲元（1956－），男，博士，教授，从事水文水资源与草原生态研究. E-mail：731011410@ qq.com

半干旱大陆气候,季节变化明显,降水量少,干燥多风[10-11]。

1.2 数据来源

气象资料数据来源于中国气象数据共享服务网(http://data.cma.cn)中国地面气候资料日值数据集(V3.0),数据已经过检验。选取锡林河流域内锡林浩特站及周边13个气象站1960—2018年逐日气象数据指标,包括降水量、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、0 cm地温、日照时数、平均风速、平均气压等数据(缺测率≤10%)[12]。为保证时间序列完整性,采用偏最小二乘回归插值法对各站1960—2018年缺测数据进行插补延展。

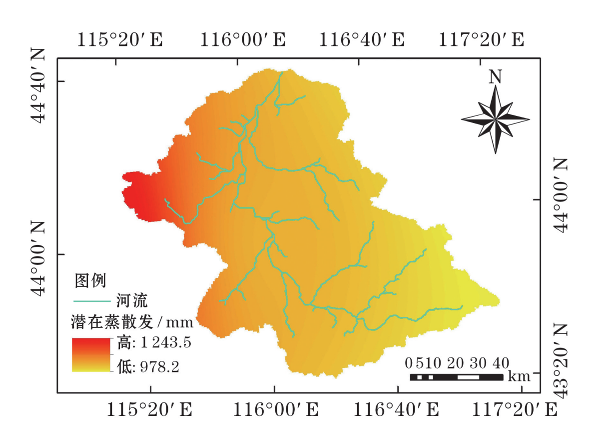


图1 研究区域及年潜在蒸散发量空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of study area and annual potential evapotranspiration

2 研究方法

2.1 Penman-Monteith公式

利用锡林河流域周边13个气象站平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速等数据,采用1998年修正的Penman-Monteith公式[13-14]估算各站多年逐日潜在蒸发量。计算公式:

$$PET = \frac{0.408\Delta(Rn-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:PET为潜在蒸发量($mm\cdot d^{-1}$);Δ为饱和水汽压曲线斜率($kPa\cdot ℃^{-1}$);R_n为太阳净辐射($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$);$G$为土壤热通量($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$);$\gamma$为干湿常数($kPa\cdot ℃^{-1}$);$U_2$为地表2 m高处的风速($m\cdot s^{-1}$);$T$为平均气温(℃);$e_s$为平均饱和水汽压;$e_a$为实际水汽压,$(e_s-e_a)$为饱和水汽压差(kPa)。

2.2 小波分析

小波变换能解释隐藏在时间序列中的多种周期变化。本文采用Morlet小波变换对多年潜在蒸散发进行分析,快速小波变换法,不涉及具体的小波函数和尺度函数,计算快速简单[15]。利用Matlab 2016a软件计算小波系数,并绘制小波方差图和系数实部等值线图。

2.3 主成分分析

利用SPASS软件进行主成分分析,此方法是数学上用来降维的统计方法,常用于多变量分析。主要原理是考察多个变量间相关性的一种多元统计方法,研究如何通过少数几个主成分来揭示多个变量间的内部结构[16]。

2.4 相关分析、偏相关分析

相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析的统计方法,从而衡量两个变量因素的密切程度。偏相关分析是指当两个变量同时与第3个变量相关时,将第3个变量的影响剔除,只分析另外两个变量之间相关程度的过程,判定指标是相关系数的R值。本文将这两种方法结合使用,对21 548个不同样本进行相关性分析。

2.5 相对湿润度指数

采用国家标准《气象干旱等级》[17]推荐的相对湿润度指数定量化的分析研究区干湿状况变化特征[18],计算公式为:

$$MI = \left(\frac{P-PE}{PE}\right)\times 100 \quad (2)$$

式中:MI为相对湿润度指数;P为某时段的总降水量(mm);PE为某时段总潜在蒸散量(mm)。

3 结果分析

3.1 历年蒸散量变化趋势分析

3.1.1 潜在蒸散发量年际变化特征 结果表明(图2),1960—2018年锡林河流域多年潜在蒸散量从整体上来看,处于明显增长趋势,线性增长趋势率为2.25。多年平均潜在蒸散量为1 105.57 mm,最小潜在蒸散量为978.23 mm(1992年),最大为1 243.51 mm(2017年)。6阶多项式曲线总体表现出,59 a来锡林河流域的潜在蒸散量有规律的波动变化,出现两个波峰,3个波谷。1960—1996年潜在蒸散发距平多为负值,1996年后潜在蒸散发量主要为正值,且波峰段持续时间较长。最大波峰出

现在2000年代，最小的波峰出现在1973年附近。地表的潜在蒸发能力呈降低—缓和—增高的增长态势。

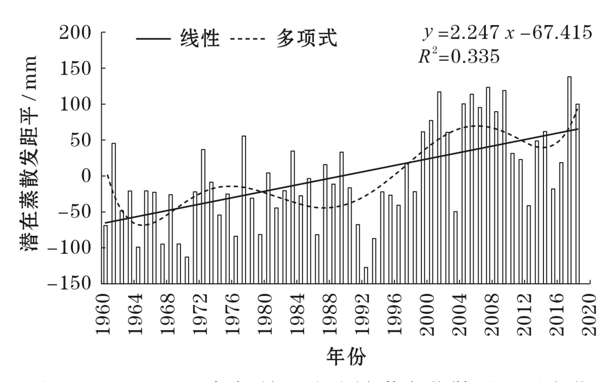


图2　1960—2018年锡林河流流域潜在蒸散量距平变化

Fig.2　Potential evapotranspiration anomalies in the Xilin River Basin from 1960 to 2018

3.1.2　*历年潜在蒸散量周期变化分析*　利用Morlet小波变换分析方法，对锡林河流域潜在蒸散发量进行周期性评价（图3）。小波方差图（图3a）显示，锡林河流域潜在蒸散发量近59 a来有较强的周期性，平均以20 a为一个主周期，以10 a为一个次周期。第一主周期出现在第30 a，即1980—2000年，具有周期性强、持续时间较长等特点。与王慧敏和李玮等[19-20]人认为这期间降水量减少、降水发生多次突变可能有关系。第二和第三主周期分别出现在第50 a和第10 a。小波实部时频分布等高线（图3b）表明，第一主周期中，明显的聚集中心有3段，间或有弱聚集存在。由强烈到衰弱，第一个强聚集中心在1970年附近，时域尺度强集中影响范围为1960—1980年；第二个为聚集分散中心在1990年附近，时域尺度强集中影响范围为1980—2000年；第三个强聚集中心在2010年附近，时域尺度强集中影响范围为2005—2015年。第二主周期实部时频图展现出与第一主周期变化相反的趋势，1990年附近为大范围的强集中区域，潜在蒸发量出现跳跃式增大。第三主周期出现在第10 a附近，出现4个聚集中心，分别在1977、1989、2001年附近。

3.2　影响因子分析

应用SPSS软件对1960—2018年日气象数据进行主成分分析。结果显示，影响因素变量与原始变量之间的依赖度基本在85%左右，第一主成分的方差贡献率高达50.15%，说明提取的主成分与原始变量间相关性较大，提取出的主成分具有一定代表性。

计算结果表明（表2）：第一主成分为平均温度、0 cm地温、日最高气温、日最低气温、和平均气压，方差贡献率为50.15%，其中平均温度、0 cm地温、日最高气温和日最低气温在第一主成分上呈正向分布，平均气压呈负向分布，即潜在蒸散发量增大时，平均温度、0 cm地温、日最高气温和日最低气温升高，平均气压降低。因此全球变暖是锡林河流域潜在蒸散发逐年增大的主要因素。第二主成分主要综合了平均相对湿度、降水量和日照时数的信息，能在一定程度上反映湿度对潜在蒸散发量产生的影响，而潜在蒸散发的逐年增加势必会影响到该地区的干湿状况的变化；第三主成分是平均风速，风将空气中的CO_2、O_2、热量等进行输送和交换，促进水分的蒸发速度，对潜在蒸散发量的影响呈正向分布，影响程度仅次于温度。

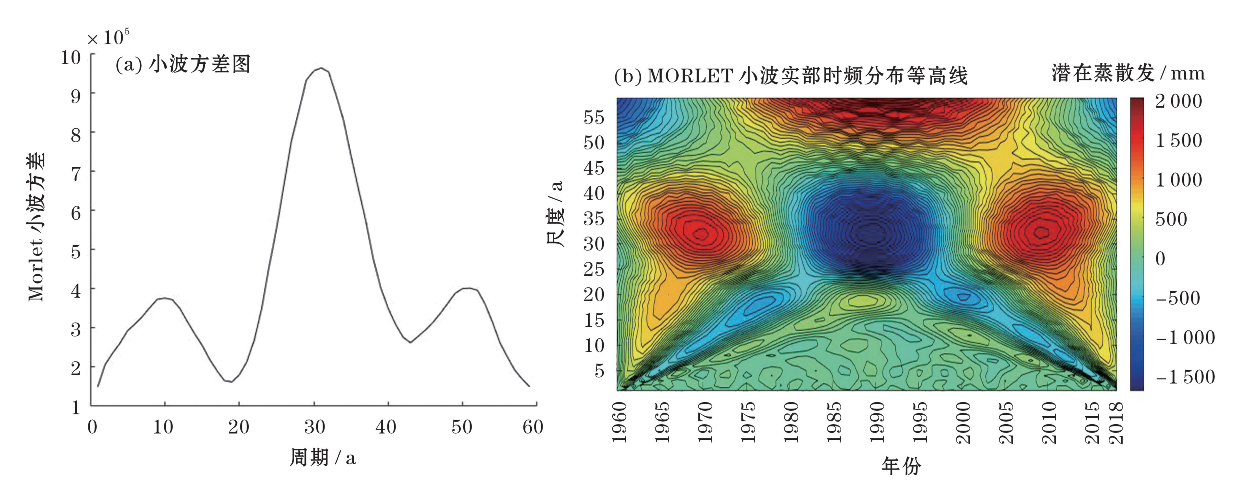


图3　锡林河流域Morlet小波变换中小波方差图及实部时频分布等高线图

Fig. 3　Wavelet variance map and real-time time-frequency distribution contour map of morlet wavelet transform in Xilin River Basin

表1 气象因子的主成分分析

Tab. 1 Principal component analysis of meteorological factors

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.513	50.149	50.149	4.513	50.149	50.149
2	1.483	16.477	66.627	1.483	16.477	66.627
3	1.145	12.727	79.354	1.145	12.727	79.354
4	0.870	9.669	89.023	—	—	—
5	0.582	6.465	95.488	—	—	—
6	0.356	3.952	99.440	—	—	—
7	0.036	0.396	99.836	—	—	—
8	0.013	0.142	99.977	—	—	—
9	0.002	0.023	100.000	—	—	—

表2 主成分分析成分载荷矩阵

Tab. 2 Principal component analysis component load matrix

成分	主成分1	主成分2	主成分3
0 cm地温/℃	0.985	-0.017	-0.079
平均气压/kPa	-0.75	0.117	-0.365
平均风速/m·s^{-1}	-0.118	-0.487	0.789
日最高气温/℃	0.982	-0.042	-0.089
平均温度/℃	0.991	-0.002	-0.056
日最低气温/℃	0.973	0.065	-0.004
日照时数/h	0.135	-0.447	-0.423
平均相对湿度/%	-0.051	0.836	-0.02
降水量/mm	0.227	0.571	0.439

3.3 相关与偏相关对比分析

为进一步研究气象因子对潜在蒸散发的影响，对1960—2018年日0 cm地温、平均风速、平均气压、最高温度、平均温度、最低温度、日照时数、相对湿度和降水量在潜在蒸散发量的控制下进行相关与偏相关分析，表3右上角为偏相关分析系数，左下角为相关分析系数。除降水量和平均风速外，其余气象因子及潜在蒸散发间均通过了0.05的置信度检验。气象因子间相关系数的变化，进一步验证了主成分分析的结果。

结果显示，偏相关系数更能反映出在剔除潜在蒸散发影响后各气象因子的相互作用。在剔除潜在蒸散发控制后，平均风速与降水量的相关性不显著；最高温度、平均温度、最低温度、0 cm地温、相对湿度和降水之间均呈正相关，温度、相对湿度间相关性最大；平均气压和日照时数呈正相关，与其余气象因子均呈负相关；平均风速与其余气象因子均为负相关。对比分析得到：平均相对湿度受到潜在蒸散发的影响较大，降水次之。

3.4 地表干湿状况变化分析

锡林河流域降水量近59 a间呈现微弱的上升趋势，线性趋势率为0.18。区域年降水量最大值为511.72 mm（2012年）；最小值为121.14 mm（2005年）；多年平均降水量为276.33 mm。多年降水量距平值呈现出正负周期性变化，且负距平出现的持续时间较长（图4）。

相对湿润度指数表征地表干湿状况，其值越小，地表越干。从图5可以看出相对湿润度指数在59 a间呈不明显的上升趋势，表明研究区地表有微弱向湿润转变的趋势。多年相对湿润度指数的最大值为-0.52（2012年）；最小值为-0.89（2005年）；多年平均为-0.77。图5表明，锡林河流域59 a间相对湿润度指数距平有3个波峰，两个波谷。较大的

表3 气象因子间及气象因子与潜在蒸散发的相关分析

Tab. 3 Correlation analysis between meteorological factors and potential evapotranspiration

变量	0cm地温/℃	平均气压/kPa	平均风速/m·s^{-1}	最高温度/℃	平均温度/℃	最低温度/℃	日照时数/h	相对湿度/%	降水量/mm
0 cm地温	—	-0.281**	-0.397**	0.950**	0.980**	0.913**	-0.041**	0.424**	0.239**
平均气压	-0.658**	—	-0.183**	-0.284**	-0.322**	-0.335**	0.084**	-0.214**	-0.202**
平均风速	-0.156**	-0.182**	—	-0.407**	-0.360**	-0.262**	-0.029**	-0.263**	-0.002
最高温度	0.986**	-0.658**	-0.163**	—	0.976**	0.873**	-0.034**	0.342**	0.217**
平均温度	0.994**	-0.671**	-0.143**	0.993**	—	0.933**	-0.061**	0.437**	0.261**
最低温度	0.965**	-0.663**	-0.111**	0.953**	0.973**	—	-0.095**	0.509**	0.297**
日照时数	0.128**	-0.049**	-0.017*	0.130**	0.114**	0.080**	—	-0.145**	-0.103**
相对湿度	-0.074**	0.062**	-0.269**	-0.112**	-0.056**	0.032**	-0.194**	—	0.333**
降水量	0.161**	-0.181**	0.001	0.150**	0.177**	0.215**	-0.095**	0.299**	—
潜在蒸散发	0.847**	-0.642**	0.065**	0.843**	0.835**	0.784**	0.176**	-0.338**	0.040**

注：*在0.05水平（双侧）上显著相关；** 0.001水平（双侧）上显著相关

波峰出现在1980年代，较小的两个波峰分别出现在1964年和2015年左右；较大的两个波谷出现在1970年代和2000年代。

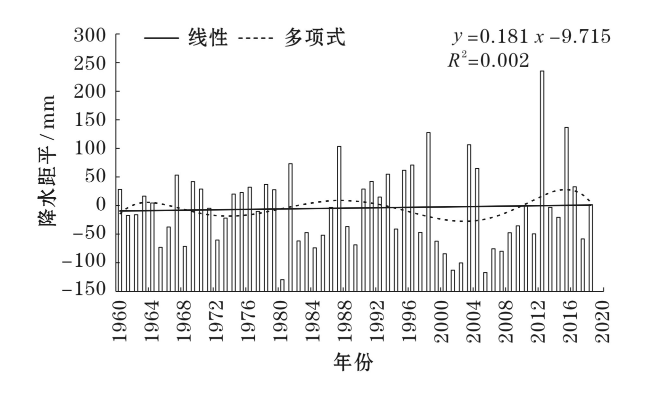


图4　1980—2018年锡林河流域降水距平变化

Fig.4　Variations in precipitation anomalies in the Xilin River Basin from 1980 to 2018

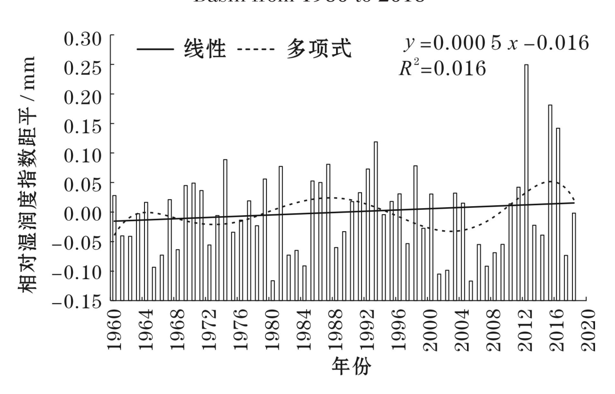


图5　1980—2018年锡林河流域相对湿润度指数距平变化趋势

Fig.5　Variation trend of relative humidity index anomalies in Xilin River Basin from 1980 to 2018

4　结 论

（1）流域历年潜在蒸散发整体呈现明显的增长变化趋势，且存在增加—减小交替的多尺度时频变化特征和多主周期变化规律，主要周期以20 a为一个周期，且这些主周期的地位有主次之分。这表明潜在蒸散发量呈增大—减小交替的多周期变化规律，小尺度的增加—减小交替变化嵌套于大尺度略为复杂的增加—减小结构中。

（2）流域潜在蒸散发量的变化是各气象要素综合作用的结果，其中0 cm地温、日最高气温、日最低气温、平均温度、日照时数、平均相对湿度、降水量和平均风速是影响影响潜在蒸散发的正影响因子，平均气压是影响潜在蒸散发的负影响因子。各气象要素中潜在蒸散发对温度的响应较大，平均风速次之。同样地，潜在蒸散发在一定程度上反作用于气象因子。在剔除潜在蒸发控制情况下，日最高温度、平均温度和最低温度之间相关性降低；日最高温度、平均温度、最低温度和相对湿度的相关性沿正向增加；日最高温和平均风速相关性沿负向增加。平均相对湿度受到潜在蒸散发的影响较大，降水次之。

（3）锡林河流域1980—2018年年降水量呈不明显的波动上升趋势，潜在蒸散发量呈现较明显的波动上升趋势，相对湿润度指数呈现微弱增长趋势。结果表明近59 a来流域降水量增加，潜在蒸散发量逐渐增加，地表干湿状况略微趋向于湿润。

（4）虽然Penman-Monteith公式有严格的推理过程，但仍然属于半经验公式，需要进一步优化方法，提高准确度。针对锡林河流域基于日时间尺度的长时间序列潜在蒸散发及相对湿润的研究较少，本文整理分析锡林河流域59 a的气象观测资料发现，流域内相对湿润度指数呈增大趋势。王海梅等[21]认为20世纪80年代和90年代是流域气候相对湿润时期，这支持了本文的研究。但本文只考虑了单一的气象影响因素，并不能直接说明流域内的干旱情况，若结合地形因子、牧草变化、土壤湿度和人类活动等因素，将会更准确、全面的了解研究区地表干湿状况的变化规律。

参考文献（References）

［1］ 高妍，冯起，李宗省，等. 1957—2012年讨赖河流域潜在蒸发量变化［J］. 中国沙漠，2014，34（4）：1125－1132.［GAO Yan，FENG Qi，LI Zongsheng，et al. Changes in potential evaporation in the Tanlai River Basin from 1957 to 2012［J］. China Desert，2014，34（4）：1125－1132.］

［2］ 韩盟伟，赵广举，穆兴民，等. 黄土高原1959—2015年潜在蒸发量的时空变化［J］. 干旱区地理，2017，40（5）：997－1004.［HAN Mengwei，ZHAO Guangju，MU Xingmin，et al. Temporal and spatial changes of potential evaporation in the Loess Plateau from 1959 to 2015［J］. Arid Land Geography，2017，40（5）：997－1004.］

［3］ 杨泽粟. 黄土高原植被生理过程和蒸散量计算方法及变化特征研究［D］. 兰州：兰州大学，2016.［YANG Zesu. Study on physiological processes and evapotranspiration calculation methods and change characteristics of vegetation on the Loess Plateau［D］. Lanzhou：Lanzhou University，2016.］

［4］ YANG Dawen，SUN Fubao，LIU Zhiyu，et al. Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based

on the Budyko and Penman hypotheses[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(18):doi:10.1029/2006GL027657.

[5] 邵月红,刘永和,吴俊梅. 蒸散量双线性曲面回归模型的改进及验证[J]. 农业工程学报,2017,33(2):94-101. [SHAO Yuehong, LIU Yonghe, WU Junmei. Improvement and validation of evapotranspiration bilinear surface regression model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(2):94-101.]

[6] GAO Y T, ZHAO C Y, ASHIQ M W, et al. Actual evapotranspiration of subalpine meadows in the Qilian Mountains, Northwest China[J]. Journal of Arid Land,2019,11(3):371-384.

[7] 宋小园,朱仲元,张圣微,等. 锡林河流域气候变化特征诊断分析[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(4):151-158. [SONG Xiaoyuan, ZHU Zhongyuan, ZHANG Shengwei, et al. Diagnosis and analysis of climate change characteristics in Xilin River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,30(4):151-158.]

[8] 宋小园. 气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016. [SONG Xiaoyuan. Hydrological process response of Xilin River Basin under the influence of climate change and human activities[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2016.]

[9] 郝祥云,朱仲元,宋小园,等. 近50 a锡林河流域极端天气事件及其与气候变化的联系[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(7):114-120. [HAO Xiangyun, ZHU Zhongyuan, SONG Xiaoyuan, et al. Extreme weather events in the Xilin River Basin and their relationship with climate change in the past 50 years[J]. Arid Land Resources and Environment,2017,31(7):114-120.]

[10] 王飞,朱仲元,张鹏,等. SRM融雪径流模型在锡林河流域的应用[J]. 干旱区研究,2019,36(3):575-581. [WANG Fei, ZHU Zhongyuan, ZHANG Peng, et al. Application of SRM snowmelt runoff model in Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019,36(3):575-581.]

[11] 宋小园,朱仲元,焦玮,等. 数字滤波法在锡林河基流分割中的比较与应用[J]. 干旱区地理,2016,39(6):1319-1326. [SONG Xiaoyuan, ZHU Zhongyuan, JIAO Wei, et al. Comparison and application of digital filtering methods in basement segmentation of Xilin River[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6):1319-1326.]

[12] 靳立亚,李静,王新,等. 近50 a来中国西北地区干湿状况时空分布[J]. 地理学报,2004,59(6):847-854. [JIN Liya, LI Jing, WANG Xin, et al. Spatiotemporal distribution of dry and wet conditions in Northwest China in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica,2004,59(6):847-854.]

[13] 张新时. 植被的PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(一)—几种主要方法与PEP程序介绍[J]. 植物生态学与地植物学学报,1989,13(1):1-9. [ZHANG Xinshi. PE (Possible Evapotranspiration) indicators and vegetation-climatic classification of vegetation (I): Introduction of several main methods and PEP programs[J]. Journal of Plant Ecology and Geobotany,1989,13(1):1-9.]

[14] 王莺,李耀辉,姚玉璧,等. 石羊河流域地表干湿变化的时空分布特征[J]. 资源科学,2013,35(10):2112-2120. [WANG Ying, LI Yaohui, YAO Yudi, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of surface wet and dry changes in the Shiyang River Basin[J]. Resources Science,2013,35(10):2112-2120.]

[15] 王文圣,丁晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展,2002,13(4):515-520. [WANG Wensheng, DING Jing, XIANG Honglian. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology[J]. Progress in Water Science, 2002,13(4):515-520.]

[16] HE S G, WANG G A, Cook D F. Multivariate measurement system analysis in multisite testing: An online technique using principal component analysis[J]. Expert Systems With Applications, 2011,38(12):14602-14608.

[17] GB/T20481-2017. 气象干旱等级[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2017. [GB/T20481-2017. Meteorological drought grade[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,2017.]

[18] 杨建平,丁永建,陈仁升,等. 近50年来中国干湿气候界线的10年际波动[J]. 地理学报,2002,57(6):655-661.[YANG Jianping, DING Yongjian, CHEN Rensheng, et al. Interdecadal fluctuations of the wet and dry climate boundary in China in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica,2002,57(6):655-661.]

[19] 王慧敏,朱仲元. 锡林河流域1981—2016年干湿变化及其与温度的关系[J]. 水土保持研究,2019,26(1):178-191. [WANG Huimin, ZHU Zhongyuan. Dry and wet changes in the Xilin River Basin from 1981 to 2016 and their relationship with temperature[J]. Research of Soil and Water Conservation,2019,26(1):178-191.]

[20] 李玮,刘廷玺,格日乐吐,等. 半干旱草原型流域不同时间尺度降水特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(2):304-312. [LI Wei, LIU Tingxi, GE Riletu, et al. Analysis of precipitation characteristics at different time scales in semi-arid steppe watershed[J]. Arid Land Geography,2017,40(2):304-312.]

[21] 王海梅. 锡林郭勒地区气候变化规律与植被覆盖变化驱动机制研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009. [WANG Haimei. Study on climate change law and driving mechanism of vegetation cover change in Xilinguole area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2009.]

Trends of potential evapotranspiration and surface wet conditions in the Xilin River Basin in recent 59 years

ZHANG Lu[1]，　ZHU Zhong-yuan[1]，　ZHANG Sheng-wei[1]，　WANG Hui-min[1]，
WANG Fei[1]，　XI Xiao-kang[2]

（1　*College of Water Resources and Civil Engineering*，*Inner Mongolia Agricultural University*，*Hohhot* 010018，*Inner Mongolia, China*；
2　*Shaanxi Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources Survey*，*Xi'an* 710068，*Shaanxi, China*）

Abstract：　Using the daily meteorological data of the period from 1960 to 2018, which were obtained from 13 meteorological stations surrounding the Xilin River Basin，Inner Mongolia，China，the Penman–Monteith formula recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations（FAO）was used to calculate the multiyear potential evapotranspiration and relative humidity index in each weather station. The potential evapotranspiration and surface wet and dry conditions of the Xilin River Basin were explored over the aforementioned period through principal component，correlation，and partial correlation analyses. The cyclical changes in the potential evapotranspiration in the Xilin River Basin and their correlations to the relative humidity index and various meteorological elements were discussed. The results indicated that the potential evapotranspiration in the basin in recent 59 a exhibited a significant overall increasing trend. Significant increasing and decreasing trends were found among the characteristics of the multiscale time–frequency changes and multiperiod changes，respectively. The response was larger，followed by average wind speed. The average relative humidity followed by precipitation were the most affected by the potential evapotranspiration. The entire basin environment exhibited an insignificant tendency to become humid.

Key words：　Xilin River Basin；potential evapotranspiration；surface wet and dry conditions